



El carboni, l'esquelet de la vida

F. Javier Casado 

Departament de Bioquímica i Biomedicina Molecular, Facultat de Biologia,
Universitat de Barcelona

Resum: El carboni va esdevenir, fa més de tres mil cinc-cents milions d'anys, l'element bàsic sobre el qual es va generar la vida a la Terra. Per què? Quines característiques el van fer tan especial? D'on va sortir el carboni necessari perquè es desenvolupés la vida? On i com el trobem? En aquest article donarem respostes a aquestes preguntes, tot estudiant l'àtom de carboni, la seva reactivitat, les formes en què es presenta a la naturalesa i els intercanvis que es produeixen entre els diversos compartiments terrestres: atmosfera, hidrosfera, litosfera i biosfera. Però l'objectiu principal serà repassar els diversos tipus de biomolècules que han permès establir, consolidar i evolucionar totes les formes de vida conegudes al nostre planeta. Els glúcids o sucres són molècules força oxidades i entre ells trobem combustibles essencials per a les nostres cèl·lules com la glucosa o la fructosa, però també molècules estructurals, com la cel·lulosa o la quitina. Els àcids grassos permeten la síntesi de diversos lípids derivats, com els triacilglicerols (greixos i olis) i els fosfolípids de les nostres membranes cel·lulars. Els lípids esteroides tenen funcions tant estructurals, en el cas del colesterol, com hormonals (com ara les hormones sexuals o la progesterona). Els aminoàcids, caracteritzats per la presència d'un grup àcid i un altre nitrogenat, són els elements bàsics per fabricar les proteïnes, responsables en darrer terme de totes les nostres funcions. Els nucleòtids, per la seva part, constitueixen els àcids nucleics, portadors i gestors de la informació necessària per fabricar les proteïnes.

Summary: CARBON, THE SKELETON OF LIFE. – Over 3,500 million years ago, carbon became the staple of life on Earth. Why? What characteristics made it so special? Where did the carbon needed to develop life come from? Where and how do we find it? In this article, we will answer these questions by studying the carbon atom, its reactivity, the ways in which it is present in nature, and the exchanges that occur between the Earth's various compartments: the atmosphere, the hydrosphere, the lithosphere and the biosphere. However, the main objective will be to review the various types of biomolecules that have allowed all the known lifestyles on our planet to become established and consolidated and to evolve. Carbohydrates, or sugars, are highly oxidized molecules and include essential fuels for our cells such as glucose and fructose, in addition to structural molecules such as cellulose and chitin. Fatty acids allow the synthesis of various derived lipids, such as triacylglycerols (fats and oils) and phospholipids for our cell membranes. Steroid lipids have structural functions, as in the case of cholesterol, or hormonal functions, as in the case of sex hormones or progesterone. Amino acids, characterized by the presence of one acid group and one amino group, are the building blocks for the manufacture of proteins, which are ultimately responsible for all our functions. Finally, nucleotides are the basic elements of nucleic acids, which are the carriers and managers of the information needed to make proteins.

L'àtom de carboni

El carboni és l'element amb número atòmic 6, representat pel símbol C, ubicat al grup 14, període 2, bloc p, de la taula periòdica, dins dels no metalls i sòlid a temperatura ambient (fig. 1). I totes aquestes dades, què volen dir? Quina informació ens aporten sobre el carboni i el seu paper a la naturalesa? Anem a interpretar-les pas a pas, a veure què en podem treure que ens permeti entendre per què va esdevenir l'element clau per a l'aparició i l'evolució del fenomen físic i químic que anomenem vida.

De totes les dades anteriors, la que resulta clau, l'autèntic DNI del carboni, és el seu número

atòmic Z, el 6. Aquest número defineix el carboni com l'element que conté 6 protons al seu nucli, de manera que qualsevol àtom, estigui en l'estat que estigui, que contingui 6 i només 6 protons serà un àtom de carboni. Evidentment, si l'àtom de carboni no està carregat elèctricament, vol dir que a més tindrà 6 electrons en els orbitals que envolten el nucli. En quins orbitals? Això ens ho diu el període i el bloc en què es troba el carboni: té orbitals del període 2 i els seus orbitals més externs són de tipus p. Per tant, i atès que cada orbital pot allotjar fins a dos electrons, la configuració electrònica del carboni serà $1s^2, 2s^2, 2p^2$, o traduït: dos electrons a l'orbital s de període 1, dos a l'orbital s de període 2 i dos en algun dels tres orbitals p de període 2.

TAULA PERIÒDICA DELS ELEMENTS

© TERMCAT, Centre de Terminologia, 2016

Més informació al [Diccionari de química](#)

Generalitat de Catalunya
Departament de Cultura

termcat
centre de terminologia

Figura 1. Taula periòdica dels elements. La taula periòdica, que ara se celebra el seu 150è aniversari, ens informa de l'estructura bàsica dels àtoms de cada element, com ara el seu símbol i el seu nom, el seu nombre atòmic (nombre de protons), massa atòmica (pes de protons i neutrons) i certa informació sobre la seva estructura electrònica (nombre d'electrons i distribució d'orbitals) (© TERMCAT, Centre de Terminologia).

Hem parlat de protons i electrons. Però, què passa amb els neutrons? En contra del que es pugui pensar, el nombre de neutrons no és fix per un element en concret, sinó que pot variar, i donar lloc als anomenats isòtops d'un element. En el cas del carboni, sabem que hi pot haver des de 2 a 16 neutrons i, com que els neutrons tenen una massa semblant (lleugerament superior) a la dels protons, aquesta variabilitat dona lloc a isòtops del carboni amb diferent nombre màssic A , que recull la suma de protons i neutrons en el nucli de cada àtom. En el cas del carboni, doncs, trobem isòtops que van del ${}^6\text{C}$ (és a dir, 6 protons més 2 neutrons) fins al ${}^{22}\text{C}$ (és a dir, 6 protons més 16 neutrons). De tota manera, a la naturalesa només en trobem tres (tots els altres són productes de laboratori):

- ${}^{12}\text{C}$, format per 6 protons i 6 neutrons, és l'isòtop de llarg més abundant de la naturalesa (representa el 98,83% del carboni de la Terra) i normalment quan parlem de carboni ens referim a ell.

- ${}^{13}\text{C}$, conté un neutró més, 7, i tot i ser minoritari (representa l'1,1% del tot el carboni), la seva presència no és menyspreable. De fet, atesa la seva estructura nuclear, presenta el fenomen conegut com a ressonànciamagnètica nuclear i la seva presència permet estudiar per espectroscòpia l'estructura d'àcids nucleics i proteïnes.

- ${}^{14}\text{C}$, amb 8 neutrons, la seva estructura nuclear no és estable i es desintegra espontàniament, convertint un dels seus neutrons en un protó i un electró que surt expulsat del nucli (el que anomenem radioactivitat β). La seva proporció a la naturalesa és infinitesimal (inferior a 10–10 % de tot el carboni), però contribueix a la radioactivitat natural i es pot fer servir per datar restes orgàniques (com ara cadàvers i mòmies).

La informació que la taula periòdica ens aporta sobre el carboni ens diu també que és un sòlid, però, de quines maneres es pot presentar aquest sòlid? Cal introduir aquí el concepte d'al·lòtrop, és a dir, cadascuna de les formes físiques en què es pot presentar un element. En el cas del carboni, existeixen diversos al·lòtrops:

- Diamant. En el cas del diamant, els àtoms de carboni estan units per enllaços C–C, i formen un entramat tetraèdric tridimensional que posseeix simetria cúbica (fig. 2A). Això li confereix una gran duresa (10 de l'escala Mohs), és a dir, molta resistència a ser ratllat, però també una certa fragilitat (es trenca fàcilment per impacte).

- Grafit. En aquest cas, els àtoms de carboni formen anells hexagonals units entre si formant capes que es van apilant, amb electrons deslocalitzats que formen enllaços amb caràcter C=C (fig. 2B). Aquesta estructura suposa una baixa duresa

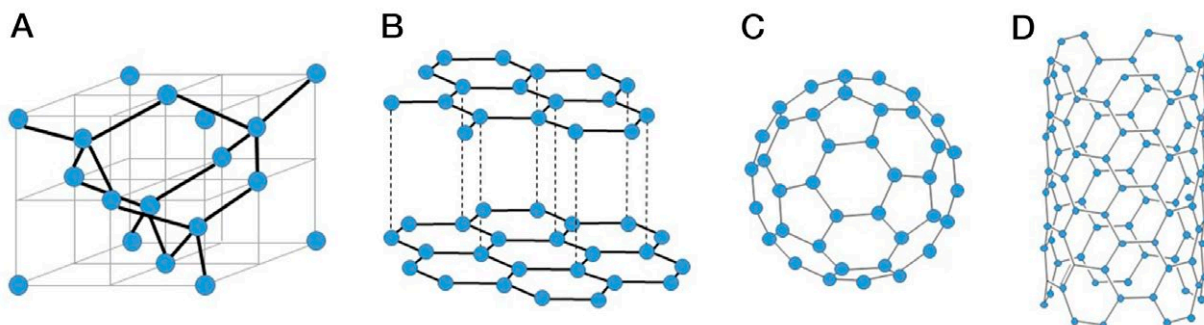


Figura 2. Estats al·lotròpics del carboni. L'àtom de carboni pot presentar-se de diverses formes físiques, anomenades al·lotrops o estats al·lotròpics. En el cas del carboni, els més coneguts són els següents: A, diamant; B, grafit; C, ful·lerè; i D, grafè.

(1-2 de l'escala Mohs), però una gran capacitat d'exfoliació en làmines.

- Ful·lerè. En realitat, es tracta d'un grup de molècules polièdriques de 20 a 540 àtoms de carboni (la més coneguda és el buckminsterful·lerè, C₆₀, semblant a una pilota de futbol) (fig. 2C).

- Lonsdaleïta. És un estat semblant al diamant, però amb simetria hexagonal. Es forma a partir del grafit d'un meteorit quan impacta amb la Terra.

- Grafit. Consisteix en una monocapa de grafit, molt lleuger i resistent, flexible i elàstic, es pot enrotllar en nanotubs (fig. 2D).

- Altres estats al·lotròpics del carboni: grafi, carbí, carboni amorf (sutge), carboni vitrificat, C2 (en estrelles).

Convé indicar aquí que el carbó mineral, en realitat, no és un al·lotrop del carboni, sinó un compost essencialment diferent, format en un alt percentatge (94-97%) per carboni, però que també conté S, N, O... (3-6%). Té una estructura reticular complexa, bàsicament semblant a la del grafit, però molt irregular a causa de la presència d'aquests altres elements, que trenquen la simetria de l'àtom de carboni.

Reactivitat de l'àtom de carboni

Per entendre la reactivitat d'un element determinat, és molt important tenir en compte la regla de l'octet. Aquesta regla va ser formulada pel químic nord-americà Gilbert Lewis l'any 1916 i diu, en síntesi, que els àtoms tenen una tendència espontània a completar els seus nivells d'energia més alts (en el cas del carboni, els del període 2) amb un nombre total d'electrons que els hi doni una configuració equivalent a la d'un gas noble. Excepte en el cas de l'heli (que només té dos electrons), en tots els altres gasos nobles aquesta capa externa conté vuit electrons i d'aquí el nom d'octet. Així doncs, la tendència normal de tots els àtoms és la de tenir una capa externa amb vuit electrons i per aconseguir-ho poden captar més electrons o cedir-ne, segons el que els resulti més senzill per arribar a aquest número de vuit. Un exemple molt senzill d'entendre és el del clorur sòdic: l'àtom de clor té set electrons a la seva darrera capa, mentre que el de sodi en té només un,

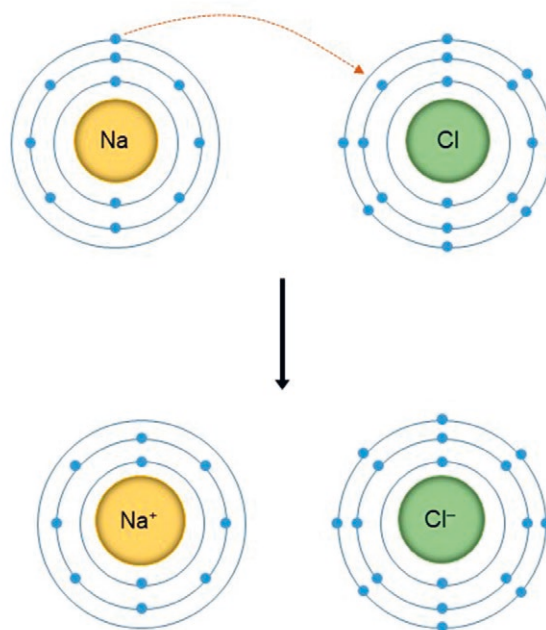


Figura 3. Enllaç iònic del clorur sòdic. Per completar la seva capa externa amb un octet d'electrons, el sodi i el clor poden bescanviar un electró i tots dos ho aconsegueixen. Això sí, com que hi ha un guany i una pèrdua d'un electró, ambdós queden carregats elèctricament, pel que esdevenen ions.

de manera que si el sodi li cedeix aquest electró al clor tots dos àtoms completaran el seu octet. Això sí, ja que hi ha un guany i una pèrdua d'electrons, tots dos es converteixen en ions (àtoms amb càrrega elèctrica): el clor guanya un electró i queda carregat negativament (ió clorur, Cl⁻) i el Na en perd un i queda carregat positivament (ió sodi, Na⁺) (fig. 3).

Veiem què passa en el cas del carboni. El carboni, als orbitals de la seva capa més externa, té quatre electrons, dos a l'orbital 2s i dos als orbitals 2p. Per aconseguir el seu octet via ionització, hauria de cedir els quatre (i adquirir la conformació de l'heli, quedant com a C⁴⁺) o guanyar-ne quatre més (i adquirir la conformació del neó, i quedar com a C⁴⁻). Tots dos processos són extraordinàriament desfavorables des del punt de vista termodinàmic,

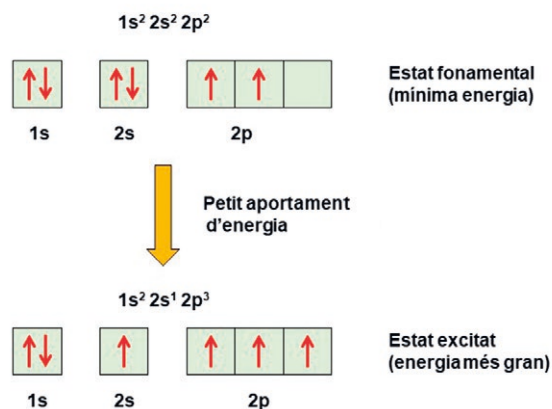


Figura 4. Reactivitat de l'àtom de carboni. Tot i que en el seu estat basal l'àtom de carboni només presenta dos electrons reactius (els més externs), amb una mínima aportació addicional d'energia pot passar fàcilment a presentar els seus quatre electrons del període dos disponibles, per a reaccionar i establir sengles enllaços covalents.

ja que requeririen una inversió molt gran d'energia i, per tant, són molt poc espontanis. Per arribar a tenir un octet, el carboni segueix una estratègia ben diferent a la del sodi i el clor: en comptes de cedir o guanyar electrons els comparteix amb altres àtoms, de manera que tots ells puguin completar els seus corresponents octets. I com es poden compartir electrons entre àtoms? Doncs establint el que anomenem enllaços covalents, de manera que els electrons compartits queden distribuïts entre els dos nuclis "enllaçats". Ara bé, quants electrons pot compartir un àtom de carboni?

En un primer moment, es podria pensar que com que el carboni només té dos electrons als seus orbitals p, els més externs, només pot compartir aquests dos electrons i, per tant, encara li mancarien dos electrons més per obtenir el seu octet. Ara bé, tot i que aquest és certament l'estat de mínima energia del carboni (i, per tant, el més freqüent en estat de repòs), una petita aportació energètica com la que té lloc quan dos àtoms de carboni col·lideixen aleatòriament a causa del seu moviment brownià, és suficient per fer passar a l'àtom de carboni a un estat excitat (és a dir, d'energia més alta) al qual un dels electrons que inicialment ocupava l'orbital 2s passa a ocupar l'orbital 2p que restava lliure (fig. 4). D'aquesta manera, el carboni disposa de quatre electrons per compartir distribuïts als seus orbitals de valència, el que li garanteix que pugui arribar a assolir el seu estat d'octet mitjançant fins a quatre enllaços covalents.

Això vol dir que el carboni, per completar el seu octet, ha d'establir obligatòriament quatre enllaços covalents? Per respondre aquesta pregunta, hem d'aturar-nos un moment a parlar de què és un orbital electrònic. Al 1913, el físic danès Niels Bohr, en un intent primerenc d'explicar l'estructura de l'àtom, va representar els orbitals electrònics seguint el model del sistema solar de

Copèrnic, és a dir, com a òrbites concèntriques al voltant del nucli. Les aportacions posteriors de De Broglie i de Schrödinger van introduir el concepte de l'electró no només com una partícula, sinó també com una ona i això va obligar a replantejar-se el concepte d'orbital. Actualment, un orbital ja no és un lloc físic on trobar un electró determinat, sinó una funció matemàtica d'ona que delimita un espai on és possible trobar un electró amb una alta probabilitat. Com a tals funcions d'ona, la seva representació gràfica ja no té perquè ser una esfera, com al model de Bohr; de fet, els orbitals s sí tenen una distribució esfèrica, però els de nivells superiors, com ara els orbitals p, no (fig. 5). Però si un orbital no és cap lloc físic, sinó una equació d'ona, dos orbitals propers poden "interferir" l'un amb l'altre, és a dir, les seves equacions es poden combinar, i donar lloc als anomenats orbitals híbrids: combinacions lineals d'orbitals atòmics pertanyents al mateix àtom. En el cas de l'àtom de carboni, com que en estat excitat tenim fins a quatre orbitals de valència, es poden donar diversos casos d'hibridació d'orbitals (fig. 5):

- Orbitals sp: s'obtenen per la combinació lineal de l'orbital 2s i un dels orbitals 2p. Es formen dos orbitals iguals, separats 180° l'un de l'altre. L'àtom de carboni, per tant, disposarà de dos orbitals sp i de dos orbitals 2p. Permeten explicar l'estructura dels composts de carboni amb triples enllaços o la del monòxid de carboni (CO).

- Orbitals sp²: s'obtenen per hibridació de l'orbital 2s i de dos dels orbitals 2p. S'originen tres orbitals iguals, situats en un mateix pla i separats 120° l'un de l'altre. Per tant, a l'àtom de carboni ens quedaran tres orbitals sp² i un orbital 2p. Aquests orbitals són els responsables dels dobles enllaços del carboni que trobem en els alquens o els hidrocarburs aromàtics i entre les biomolècules, a totes les cetones, aldehids i àcids carboxílics, així com la de tots els carbonats.

- Orbitals sp³: procedeixen de la combinació de l'orbital 2s i dels tres orbitals 2p. Es formen quatre orbitals iguals, orientats segons els vèrtexs d'un tetraedre, és a dir amb angles de 109,5°. Tots els orbitals de l'àtom de carboni, doncs, seran de tipus sp³, equivalents entre ells. Això permet explicar l'estructura tetraèdrica del metà, CH₄, però també la de tots els compostos de carboni amb enllaços simples.

Aquesta versatilitat quant a la possibilitat d'establir diversos tipus d'enllaços covalents és el que explica en bona part la immensa quantitat de compostos químics basats en el carboni, tant dels seus compostos inorgànics com dels seus compostos orgànics (el que inclou la pràctica totalitat de les biomolècules conegudes).

El carboni a la naturalesa: el cicle del carboni

S'entén per cicle del carboni el conjunt de canvis de carboni entre els diferents components del Planeta: l'atmosfera, la litosfera, la hidrosfera

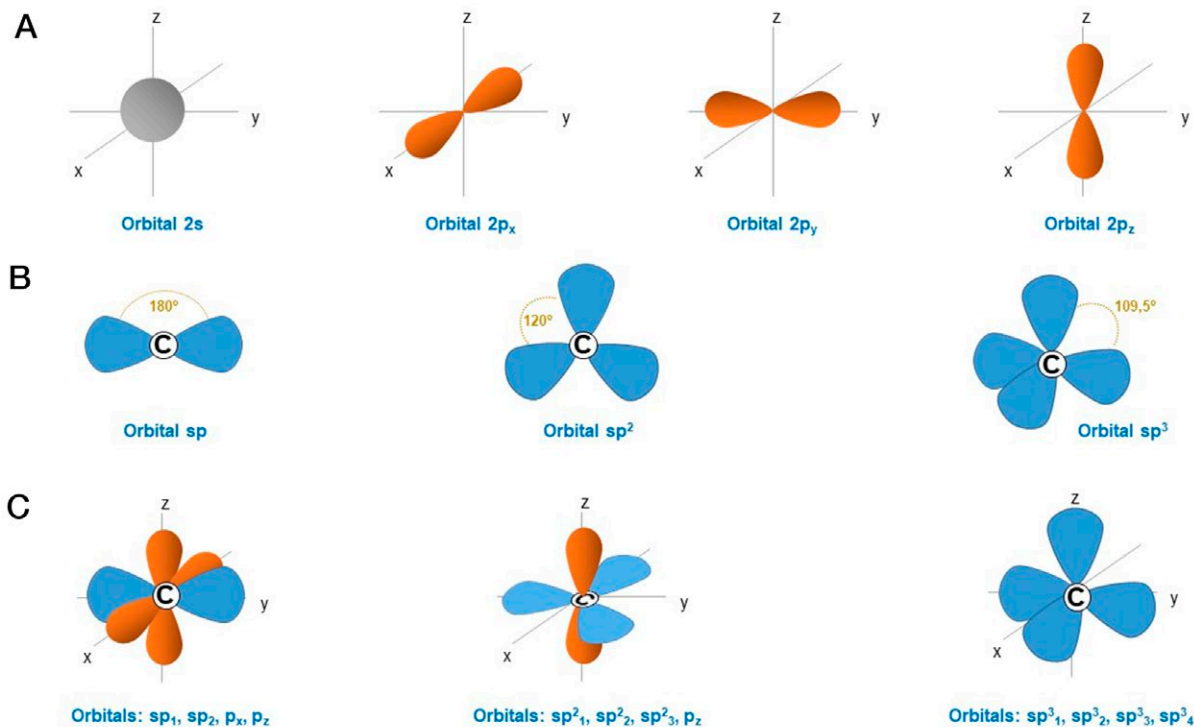


Figura 5. Orbitals electrònics de l'àtom de carboni. A, en ser un element del període 2, l'àtom de carboni presenta un orbital de tipus s (2s) i tres de tipus p (2p_x, 2p_y i 2p_z); la funció d'ona de l'orbital s té una geometria esfèrica, mentre que les dels orbitals p presenten dos nodes radials que conflueixen al nucli de l'àtom. B, les funcions d'ona dels orbitals 2s i 2p es poden combinar, "hibridar", i donar lloc a orbitals híbrids: sp (entre l'orbital 2s i un orbital 2p), sp² (entre l'orbital 2s i dos orbitals 2p) i sp³ (entre l'orbital 2s i tots tres orbitals 2p), cadascun d'ells amb una geometria resultant diferent. C, en el cas de la hibridació sp, els orbitals resultants són dos orbitals sp i dos orbitals p, el que permet establir enllaços covalents triples; en el de la hibridació sp², els orbitals resultants són tres orbitals sp² i un orbital p, el que permet els enllaços dobles; i en el de la hibridació sp³, la més comuna, es formen quatre orbitals sp³, idonis per establir enllaços senzills.

i la biosfera; es tracta, doncs, d'un cicle biogeològic, amb intensos fluxos de carboni entre aquests compartiments, que s'ha vist afectat molt recentment per l'activitat humana (fig. 6).

L'atmosfera primigènia de la Terra és molt probable que s'acabés perdent durant la formació del Planeta, però poc després es va començar a formar-se'n una de nova, particularment rica en nitrogen, vapor d'aigua i diòxid de carboni (CO₂). Pel que fa al CO₂, el seu origen era exclusivament volcànic, ja que les erupcions volcàniques van projectar a l'atmosfera part del carboni atrapat a l'interior de la Terra. Encara ara l'activitat volcànica, molt més minsa del que va ser fa milions d'anys, continua sent una de les fonts de carboni atmosfèric. La major part d'aquest CO₂ original ha estat introduït, per acció del cicle biogeològic del carboni, en els reservoris de la litosfera, la hidrosfera i la biosfera, de manera que la concentració actual de CO₂ a l'atmosfera és molt menor del que va ser inicialment.

Atesa la seva gran solubilitat en aigua, les precipitacions atmosfèriques i les aigües de lixiviació aporten grans quantitats de carboni als oceans, que es converteixen així en una gran reserva de carboni, fonamentalment en forma d'ió bicarbo-

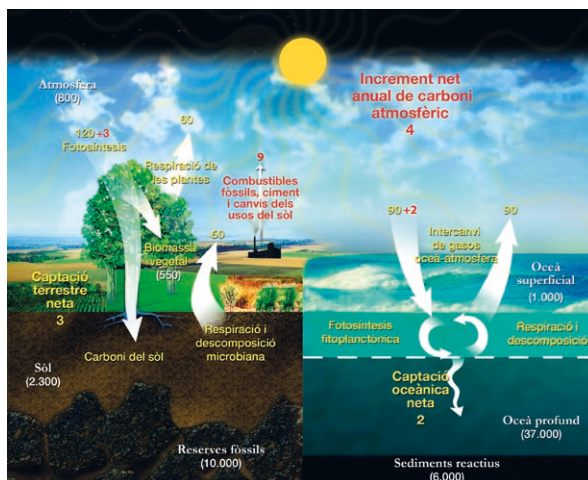


Figura 6. Cicle del carboni. L'esquema recull els diferents bescanvis de carboni (en gigatonnes per any) que, de forma natural, es produeixen entre l'atmosfera, la hidrosfera, la litosfera i la biosfera i de quina manera el carboni queda emmagatzemat en cadascun d'aquests compartiments. També s'indica, en color vermell, la contribució antropogènica actual, que ha pertorbat considerablement els equilibris preexistents i que és un dels factors més decisius en el procés d'escalfament global i de crisi climàtica actual (imatge: US DOE, domini públic).

nat (HCO_3^-), però també d'ió carbonat (CO_3^{2-}) i fins i tot del mateix CO_2 lliure.

A partir d'aquest carboni molts organismes marins poden construir les seves estructures rígides, com ara les closques dels mol·luscs o l'exoesquelet dels coralls.

Amb la mort d'aquests organismes, el seu carboni és dipositat als fons marins i aquests sediments poden acabar formant roques sedimentàries calcàries.

Pel que fa a la participació de la biosfera, hi ha un continu flux bidireccional de carboni des de i envers l'atmosfera. Els éssers vius autòtrofs fixen el CO_2 atmosfèric, per mitjà del procés anomenat fotosíntesi, que permet obtenir molècules orgàniques. Aquestes biomolècules són consumides per tots els éssers vius que, mitjançant els processos de la fermentació i la respiració (però també de la combustió procedent d'incendis espontanis), el retornen directament a l'atmosfera. La mort i descomposició d'aquests organismes també pot aportar una certa quantitat de carboni a la litosfera.

Dins d'aquest panorama, en perfecte equilibri durant milions d'anys, la irrupció de l'activitat humana en temps recents ha causat un veritable daltabaix en aquests fluxos, ja que la combustió de combustibles fòssils així com l'enorme increment en incendis provocats ha tornat a l'atmosfera una enorme quantitat de carboni que estava retingut en els altres reservoris, amb conseqüències potencialment calamitoses per a la vida en el Planeta.

El carboni a l'atmosfera

Analitzarem a partir d'ara de quines formes trobem el carboni a la naturalesa i començarem per les espècies de carboni a l'atmosfera.

De llarg, el principal gas carbònic atmosfèric és el diòxid de carboni. En un principi, el seu origen va ser exclusivament volcànic, ja que és un dels principals components gasosos de les erupcions volcàniques, molt més freqüents en els albars de la formació de la Terra que no pas actualment. De fet, es té el convenciment que va ser la font de carboni la que va permetre l'aparició i posterior desenvolupament de la vida a la Terra, a partir de la qual van aparèixer les primeres biomolècules. Un cop la vida ja era un fenomen comú al Planeta, es va establir una relació de bescanvi de CO_2 entre l'atmosfera i la biosfera: els éssers vius en consumeixen per fixar-lo en molècules orgàniques i el retornen com a producte de la seva respiració. Això, juntament amb la reducció de la seva producció volcànica, ha fet que la concentració atmosfèrica de CO_2 hagi estat relativament constant des de fa milions d'anys. Així, per exemple, a partir de dades dels darrers 800.000 anys, se sap que els seus valors han anat oscil·lant entre les 180 i les 280 ppm, coincidint respectivament amb períodes més freds i més càlids. Aquesta dada és important, ja que el CO_2 no només va permetre la

vida a la Terra pel seu contingut de carboni, sinó també perquè actua com a gas amb efecte hivernacle: impedeix la pèrdua de l'escalfor produïda per la radiació solar, el que fa que la Terra tingui una temperatura més temperada del que li correspondria per la seva llunyania del Sol i això ha afavorit l'explosió de formes de vida al Planeta. Malauradament, l'activitat humana ha ocasionat un increment alarmant de CO_2 a l'atmosfera, de manera que aquest temperament s'està convertint en un autèntic escalfament; l'observatori del Mauna Loa (Hawaii) va registrar per primer cop un valor de 400 ppm al maig del 2013 i per sobre dels 410 al maig del 2017.

A l'atmosfera també trobem monòxid de carboni (CO), tot i que en concentracions molt més baixes, de l'ordre de les 80 ppb. Aquest gas també pot tenir origen volcànic i de combustions espontànies però, tot i els seus baixos nivells globals, pot arribar a concentracions puntualment tan elevades que causin la mort, especialment a causa d'una mala combustió en aparells comuns, com calderes, estufes o brasers. La seva toxicitat és deguda a la seva capacitat d'unió a l'hemoglobina, el que impedeix el transport d'oxigen dels pulmons cap als nostres teixits i, per tant, la mort per asfíxia.

Per últim, a l'atmosfera també hi ha metà (CH_4). Els seus nivells són fins i tot més baixos que els del monòxid de carboni (no més enllà d'1-2 ppb), però pot esdevenir un gran problema per al Planeta. Tot i que el seu efecte hivernacle té una durada menor que el del CO_2 , la seva intensitat és fins a 25 vegades més gran i cada vegada en produïm més. L'origen d'aquest gas és majoritàriament orgànic (descomposició incompleta de matèria orgànica) i activitats humanes com l'extensió dels cultius en humit (arrossars), la crema de residus i de boscos o, sobretot, la ramaderia intensiva són fonts constants de metà atmosfèric. Però, a més, el metà pot ser retingut als fons marins i als sòls glaçats (el permafrost) en forma de clatrats i es calcula que la quantitat de metà retingut d'aquesta manera pot ser equivalent a la de les reserves de combustibles fòssils; però aquests clatrats són estables només a baixes temperatures, i si la temperatura de la Terra continua pujant, podrien alliberar el seu contingut en metà, contribuint encara més a l'escalfament global.

El carboni a la litosfera

Pel que fa al carboni present a la litosfera, ens cal d'entrada distingir entre tres formes ben diferents: roques carbonatades, minerals de carboni i el que podem anomenar combustibles fòssils.

Roques

Les principals roques carbonatades són d'origen sedimentari i entre totes destaca la calcària, la més abundant (fig. 7A). La calcària està



Figura 7. Roques carbonatades. La majoria de les roques carbonatades són d'origen sedimentari, tot i que també n'hi ha d'origen igni i metamòrfic. A, massís del Garraf: exemple dels nombrosos massissos de roca calcària de Catalunya; B, catedral de Girona: les escales que pugen fins a la catedral estan fetes de calcària fossilífera de Tavertet; C, massís dels Dolomites: exemple dels no tan abundants massissos de roca dolomia; D, penya-segats d'Étretat, a Normandia: exemple de formacions de creta d'origen biogènic; E, Pamukale (Turquia): exemple de formació de travertí deguda a la precipitació de carbonat de calci en aigües hidrotermals; F, margues blaves de la plana de Vic i àrees properes: roca majoritàriament carbonatada, dipositada en el fons d'antigues conques lacustres i mars interiors poc profunds; G, cantera de marbre de l'illa grega de Naxos: el marbre té una composició molt semblant a la calcària, però és d'origen metamòrfic, procedent d'antigues roques calcàries sotmeses a una gran pressió; H, Moisès, de Miquel Àngel: exemple d'utilització artística del marbre, gràcies al seu aspecte gairebé vitri; I, lava carbonatítica del volcà Oldoinyo Lengai, a Tanzània: exemple de roca carbonatada d'origen igni (fotos: A, A. Guerrero; B, G. Jansoone; C, Kallerna; F, F. Vallès; G, H. Gorski; H, J. Bittner Unna; CC BY-SA 2.0, 3.0)

formada majoritàriament per carbonat de calci (CaCO_3), cristal·litzat sobretot en forma de calcita. Aquesta roca s'origina per sedimentació en mars càlids i poc profunds, molt comuns en els períodes precambrià i cambrià, però que a petita escala es continua produint actualment, per exemple, a les zones de manglars o als esculls de corall. En aquests casos, la font de carboni sol ser biòtica, a partir de les restes d'organismes rics en carbonat, com ara les closques dels mol·luscs o els coralls durs. Per això, molt sovint es troben calcàries fossilíferes, amb abundants restes orgàniques fàcilment recognoscibles, com a les escales de la catedral de Girona (fig. 7B). La calcària també pot tenir un origen hídric, a partir del bicarbonat dissolt a les aigües àcides quan aquestes alliberen el seu CO_2 a l'atmosfera, el que implica la precipitació de carbonat càlcic; aquest fenomen no només té lloc en conques marines, sinó que també pot succeir sobre els continents. La roca calcària s'ha fet servir tradicionalment en construcció, ja que és força resistent a la meteorització, i com a component essencial del ciment. Tanmateix, és fàcilment erosionable per l'aigua de la pluja i els rius, sobretot si és relativament àcida, el que provoca la seva solubilització, generant paisatges típics de coves i avencs (càrstics).

Una altra roca carbonatada sedimentària és la dolomia (fig. 7C), formada majoritàriament pel mineral dolomita, un carbonat càlcic-magnèsic, d'origen normalment químic per substitució de part del calci per magnesi abans de la litificació dels sediments. És molt més resistent a l'erosió que la calcària, el que li permet formar paisatges peculiars per erosió diferencial amb altres roques, com els Alps Dolomítics o les cataractes del Niàgara. Té usos industrials més puntuals, com en metal·lúrgia o en ciments especials, però no és tan apreciada com a pedra de construcció.

També són roques carbonatades sedimentàries, majoritàriament formades per carbonat càlcic, la creta (de color blanc i microporosa, formada per la precipitació del carbonat càlcic d'uns microorganismes anomenats cocolitòfors, fig. 7D) o el travertí (de colors molt diversos, formada per la precipitació sobtada del carbonat dissolt a l'aigua quan aquesta es veu sotmesa de cop a un augment de temperatura, per exemple, a una zona amb activitat geotèrmica, fig. 7E). Les margues (fig. 7F) són també roques carbonatades d'origen sedimentari, procés durant el qual es van barrejar amb argiles, típiques de conques lacustres i mars epicontinental, com ara el que cobria la plana de Vic durant l'Eocè (fa entre 35 i 50 milions d'anys).

Però també tenim roques carbonatades amb un origen no sedimentari. Així, el marbre (fig. 7G) és una roca metamòrfica d'aspecte cristal·lí, originada per l'alteració d'altres roques carbonatades (sobretot, calcària i dolomia) produïda a alta pressió per fenòmens geològics; la seva llusor la

fa especialment atractiva en arts decoratives (fig. 7H). Les carbonatites són roques ígnies portadores del carboni de l'interior de la Terra, que poden arribar a la superfície per processos lents d'ascensió i refredament del magma o per processos eruptius sobtats, com el dels volcans carbonatítics, dels quals només es coneix un cas en què hi hagi hagut erupcions en temps històrics, l'Oï Doinyo Lengai, a Tanzània (fig. 7I).

Minerals

Sense ser el grup més abundant de minerals de la Terra (aquest lloc l'ocupen els silicats), hi ha una gran diversitat de minerals formats per carboni, en la seva immensa majoria, carbonats. En destaquem dos, però, només formats per carboni (i, per tant, com ja hem comentat abans, són al·lòtrops del carboni): el diamant (fig. 8A), amb una gran duresa i una llusor característica (adamantina), format habitualment, a grans profunditats, al mantell terrestre, en condicions d'altres pressions i temperatures; i el grafit (fig. 8B), en què els àtoms de carboni formen làmines entrelligades unes amb les altres, el que li confereix baixa duresa, però gran exfoliació, de manera que permet el seu ús tant artístic i cultural (el llapis) com a lubricant industrial o, més recentment, com a semiconductor.

La majoria dels minerals de carboni, però, pertanyen al grup dels carbonats, als quals el carboni es troba en forma d'anió carbonat unit per forces iòniques a tot tipus de cations metàl·lics. Entre els carbonats (se'n coneixen més de 250 diferents), en podem destacar alguns ja sigui per la seva abundància o per la seva utilitat:

- La calcita, CaCO_3 cristal·litzat al sistema trigonal. Probablement, és el carbonat més abundant, tant en microcristalls (com per exemple formant la calcària) com en fenocristalls de fins a alguns decímetres d'aresta (fig. 8C). Carbonats semblants a la calcita són la siderita (FeCO_3), la rodocrosita (MnCO_3) o la smithsonita (ZnCO_3).

- L'aragonita, CaCO_3 cristal·litzat al sistema ortoròmbic. No és tan abundant com la calcita, però també es troba molt estès. És fàcil trobar-lo en macles aparentment hexagonals (fig. 8D). Molt semblant a l'aragonita és la cerussita (PbCO_3).

- L'atzurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) i la malaquita ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), dos carbonats de coure de colors molt lluent (blau i verd, respectivament) emprats des de la prehistòria com a pedres semiprecioses i explotats més recentment com a font de coure (fig. 8E).

- El natró ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$), emprat pels egipcis en el procés de momificació.

- Els carbonats de terres rares (ceri, lantà, neodimi, gadolini, etc.), fins fa poc uns minerals que només interessaven els especialistes, però que han esdevingut molt preuats des que aquests elements s'han començat a fer servir en les noves aplicacions tecnològiques.

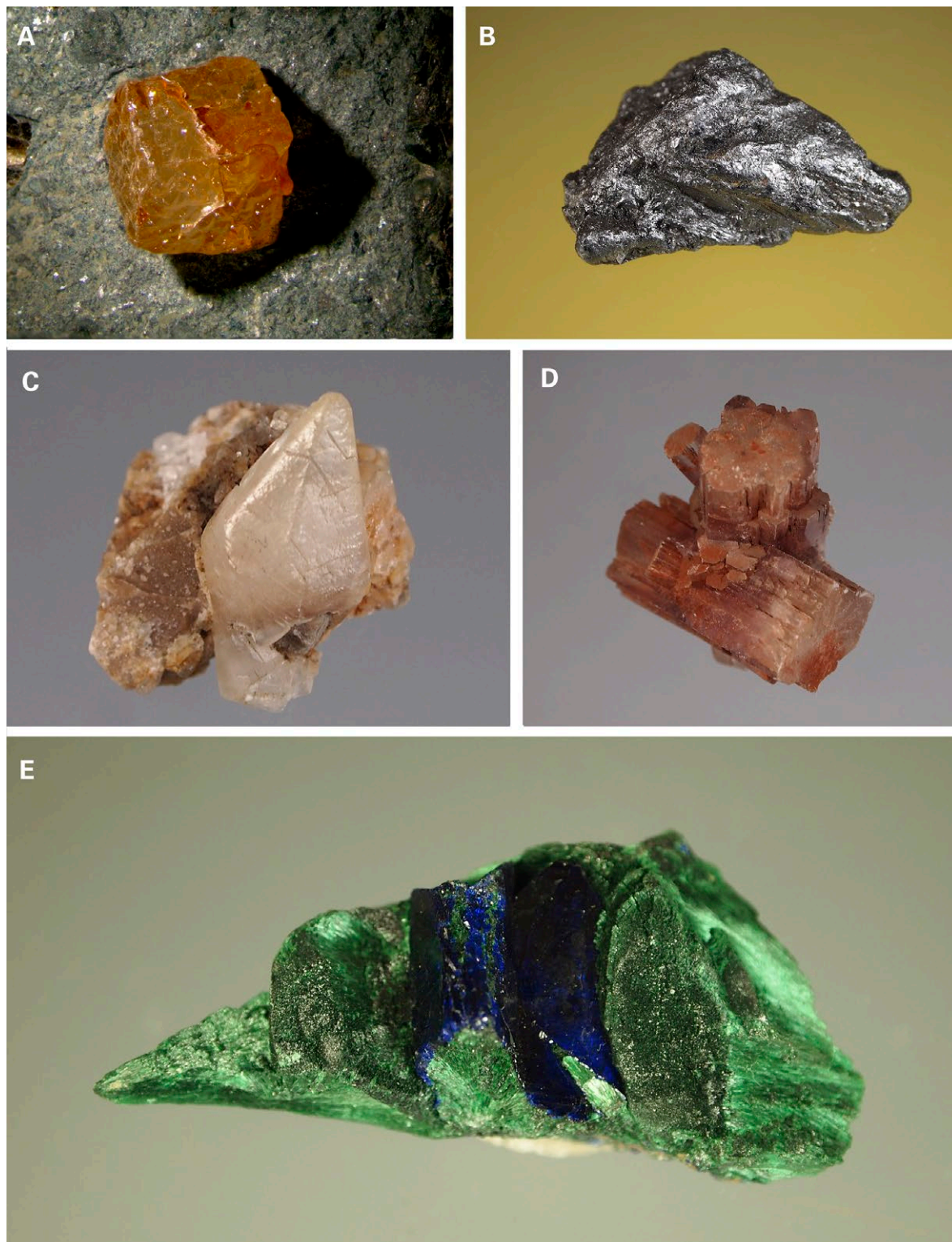


Figura 8. Minerals de carboni. La majoria dels minerals que presenten carboni ho fan en forma de carbonat, però hi ha algunes excepcions, dues d'elles ben conegudes. A, diamant (mina Miba, R.D.Congo): carboni pur cristal·litzat en el sistema cúbic, per la disposició que prenen els àtoms de carboni; B, grafit (mina Kalangaha, Sri Lanka): carboni pur cristal·litzat en el sistema hexagonal, també per la disposició dels seus àtoms; C, calcita (pedrera Ballús, Cercs, Berguedà): carbonat càlcic, un dels minerals més abundants del Planeta; D, aragonita (Molina de Aragón, Guadalajara): una altra forma de carbonat càlcic, menys abundant que la calcita; E, atzurita i malaquita (mina Milpillars, Mèxic): dos carbonats hidratats de coure, molt abundants a tots els jaciments de coure. Tots els exemplars pertanyen a la col·lecció particular de l'autor.

Combustibles fòssils

Sota aquesta denominació, trobem un conjunt de materials de composició basada en el carboni, i per tant susceptibles de ser emprats com a combustibles, originats per la descomposició parcial de matèria orgànica acumulada des de fa milions d'anys, modificada per processos geològics deguts a les elevades pressions i temperatures causades pels sediments acumulats sobre seu. Dins d'aquesta categoria trobem, especialment, el carbó, el petroli i el gas natural.

– El carbó és una roca sedimentària d'origen orgànic, de color negre o marró fosc, formada majoritàriament per l'element carboni (entre un 50 i més d'un 95% en pes), juntament amb altres components com ara l'aigua (que pot arribar a representar prop d'un 30% del seu volum), altres elements (ferro, cadmi, fins i tot traces d'or) i minerals, tant carbonats (com la calcita, l'aragonita o la siderita) com minerals de sofre (pirita, guix). Segons el percentatge de carboni que contenen, trobem els diferents carbons que, en proporció ascendent de carboni, són la torba, el lignit, l'hulla i l'antracita. Es creu que la major part del carbó actual es va formar a partir de vegetació terrestre al període carbonífer (fa 280 a 345 milions d'anys), al Paleozoic, tot i que també hi ha dipòsits de carboni originats als períodes permia (també del Paleozoic) i triàsic i juràssic (del Mesozoic). Durant el període cretaci (Mesozoic) es va formar el lignit i actualment encara trobem formació de torba a les torberes.

– El petroli és una barreja més o menys fluida o viscosa d'hidrocarburs, originat a les conques marines poc profundes per acumulació de les restes de plàncton atrapades entre el fang del fons de la conca sedimentària. Aquestes restes d'organismes poden sofrir un procés d'oxidació, però, si queden aïllats de l'oxigen de l'aigua per una capa de sediment inorgànic impermeable, poden patir un procés anaeròbic en el qual es combinen l'acció biològica de bacteris anaeròbics que generen els hidrocarburs amb l'acció física de l'augment de pressió i temperatura que porta a la compactació i la litificació del sediment.

– El gas natural es va formar en les mateixes condicions que el petroli i és molt habitual trobar-los tots dos junts als mateixos dipòsits. En realitat, és una mescla de gasos el component principal del qual és el metà (CH_4), tot i que conté també altres hidrocarburs lleugers com l'età (C_2H_6), el propà (C_3H_8) o el butà (C_4H_{10}).

El carboni a la biosfera: biomolècules

Les peculiaritats químiques de l'àtom de carboni que hem explicat anteriorment justifiquen, entre altres raons, el perquè ha esdevingut l'element clau per a l'evolució de la vida. La seva versatilitat per formar compostos basats en el carboni i, ahora, la capacitat de reaccionar amb altres elements com, sobretot, l'hidrogen, l'oxi-

gen, el nitrogen, el sofre i el fòsfor, multipliquen el nombre de molècules que es poden obtenir, amb una diversitat igual de gran de funcions químiques que poden ser assumides per aquestes molècules. Entrem en el immens, tot i que submicroscòpic, món de la bioquímica. Per poder fer un repàs de totes aquestes biomolècules, el millor serà descriure-les per famílies, per així poder-nos fer una idea de la seva enorme varietat d'estructures i funcions.

Glúcids

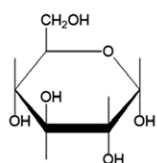
Els glúcids són biomolècules orgàniques formades bàsicament per carboni, hidrogen i oxigen (alguns poden contenir nitrogen, fòsfor o sofre), caracteritzats per presentar alguns grups funcionals carbonil (aldehid o cetona) i molts grups hidroxil ($-\text{OH}$). També se'ls ha donat els noms de sucres, hidrats de carboni o carbohidrats, però probablement el més adient sigui el de glúcids, que engloba tota la seva diversitat. Dins dels glúcids trobem algunes de les principals molècules energètiques que permeten la vida (glucosa) i els seus polímers de reserva (midó, glucagó), però també compostos estructurals importants (cel·lulosa, quitina) i d'altres que participen en les estructures d'altres molècules (ribosa, desoxiribosa).

Atès que, a causa de les seves característiques, les molècules glucídiques més simples es poden combinar entre elles per donar d'altres de més complexes, la classificació habitual dels glúcids es fa segons el seu grau de polimerització:

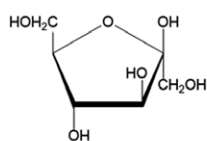
– Monosacàrids. Són els glúcids més senzills, formats per cadenes lineals d'entre tres i set àtoms de carboni (anomenats respectivament trioses, tetroses, pentoses, hexoses i heptoses), un dels quals té una funció carbonil (i així definim les aldoses, si és un grup aldehid, i les cetoses, si és un grup cetona) i els altres tenen grups hidroxil. En dissolució, però, tot i ser molècules lineals poden formar anells heterocíclics a causa de la reacció d'un dels grups hidroxil amb el grup carbonil, i formar un hemiacetal. Entre els principals monosacàrids, trobem: la glucosa, sens dubte el glúcid més abundant a la naturalesa tot i que és molt rar trobar-lo en forma lliure; la fructosa, que pot arribar a ser el glúcid predominant en certes fruites, com pomes, peres, plàtans o raïm; i les pentoses ribosa i desoxiribosa, imprescindibles en l'estructura dels àcids nucleics (fig. 9).

– Disacàrids. Consisteixen en dues molècules de monosacàrids unides mitjançant un enllaç glicosídic. Alguns d'ells són molt abundants en la naturalesa i formen part habitual de la nostra dieta des de fa milions d'anys. La sacarosa, formada per una glucosa i una fructosa, és el disacàrid més abundant en els aliments d'origen vegetal, sobretot la fruita, i és el component únic del sucre que afegim al cafè i als pastissos. La lactosa, constituïda per una glucosa i una galactosa, és el sucre de la llet que, com a mamífers que som, és una

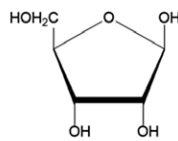
MONOSACÀRIDS



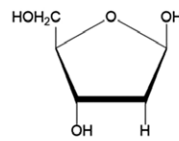
α -D-Glucosa



α -D-Fructosa

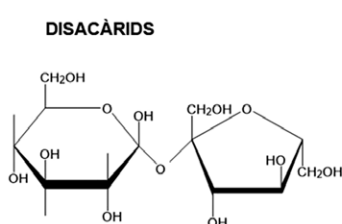


α -D-Ribosa

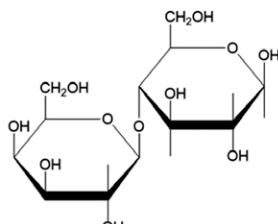


α -D-Desoxirribosa

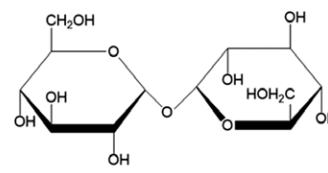
DISACÀRIDS



Sacarosa



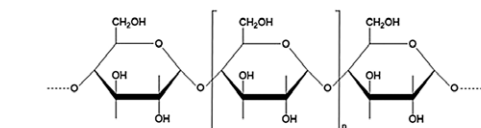
Lactosa



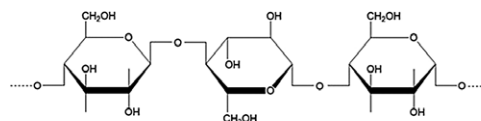
Trehalosa

Figura 9. Glúcids: monosacàrids i disacàrids. Els monosacàrids representen els glúcids (o “sucres”) més senzills que hi ha a la naturalesa; hi trobem, entre altres, la glucosa (el més abundant i, probablement, el més important de tots), la fructosa (abundant a algunes fruites) o la ribosa i la desoxiribosa, que formen part dels àcids nucleics com l'ARN i l'ADN. Els disacàrids estan formats per dos monosacàrids units mitjançant un enllaç glucosídic i alguns d'ells formen part essencial de la nostra dieta, com ara la sacarosa, present a tots els vegetals i fruites, la lactosa, el sucre de la llet de tots els mamífers, o la trehalosa, menys conegut, però abundant en insectes, crustacis i bolets, que han format part de la nostra dieta al llarg de la nostra evolució.

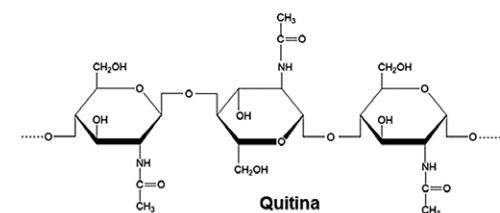
POLISACÀRIDS



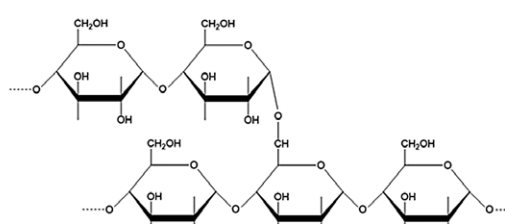
Amilosa (midó)



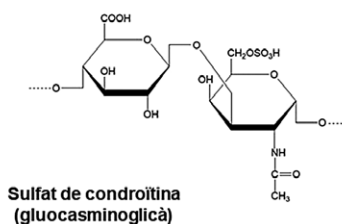
Cel·lulosa



Quitina



Amilopectina (midó) / Glicogen



Sulfat de condroitina
(glucosaminoglicà)

Figura 10. Glúcids: polisacàrids. Els polisacàrids estan formats per un nombre generalment elevat de molècules de monosacàrids i poden tenir funció de reserva sobretot de glucosa, com el midó vegetal (una barreja d'amilosa i amilopectina) o el glicogen dels animals, o funció estructural, com la cel·lulosa, la quitina o els glucosaminoglicans.

font valuósíssima d'energia durant el nostre període d'alletament. La trehalosa, que consta de dues glucoses, és un component habitual de la nostra dieta, present en fongs, insectes i crustacis (fig. 9).

– Polisacàrids. Són cadenes de centenars o milers de monosacàrids units per enllaços glucosídics, ja sigui amb finalitats d'emmagatzemament o estructurals. Entre els polisacàrids de reserva, els més coneguts són el midó dels vegetals

i el glicogen dels animals. En el cas del midó, es barregen dos tipus de cadenes: l'amilosa, en la qual les molècules de glucosa s'ordenen en una única cadena lineal; i l'amilopectina, en què de tant en tant, de la cadena lineal de glucoses surt una ramificació lateral que origina una segona cadena unida a la primera. El glicogen té una estructura semblant a la de l'amilopectina, però amb ramificacions molt més abundants. Entre els

ESTRUCTURA GENERAL D'UN ÀCID GRAS

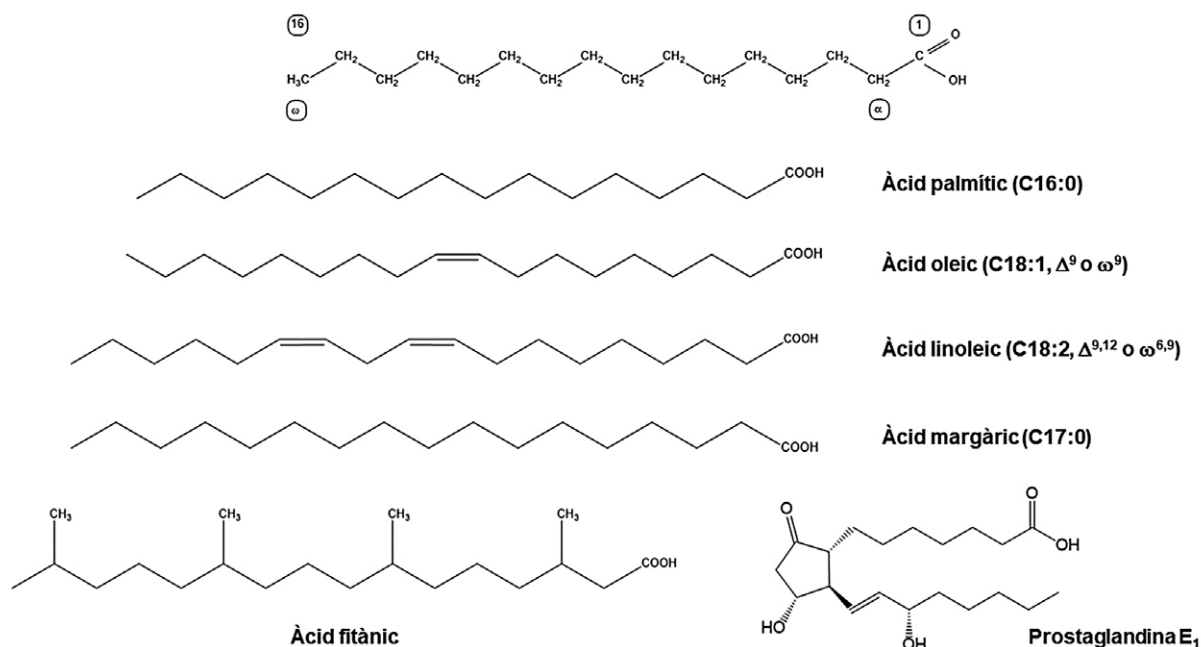


Figura 11. Lípids: àcids grassos. Els àcids grassos són els lípids més abundants i formen part de molts altres lípids més complexos. Estan formats per cadenes alifàtiques d'àtoms de carboni, amb un extrem totalment oxidat (el grup carboxil terminal) i poden contenir alguns dobles enllaços. La posició d'aquests dobles enllaços, o insaturacions, es pot comptar des del carboni 1 (el que té el grup carboxil) o, pel contrari, des de l'extrem oposat de la molècula, l'anomenat carboni ω. Com que són fabricats a partir de l'acetat (que té dos carbonis), en general solen tenir un nombre parell d'àtoms de carboni i no tenen cap ramificació, però com sovint passa en biologia trobem excepcions a totes dues regles. Els àcids grassos poliinsaturats també poden servir per fabricar altres molècules derivades, com les prostaglandines.

polisacàrids estructurals, els més coneguts són la cel·lulosa, que forma la paret característica de les cèl·lules vegetals; la quitina, en certa manera semblant a la cel·lulosa i amb una funció paral·lela, però en fongs, insectes, crustacis i aràcnids; i els glucosaminoglicans que formen part dels nostres lligaments i tendons (fig. 10).

Lípids

Sota el terme lípids (de vegades, mal anomenats greixos), trobem tot un seguit de biomolècules força diferents, però que comparteixen una propietat bàsica: tenen una solubilitat molt baixa en aigua i molt alta en dissolvents orgànics. La unitat estructural bàsica de tots els lípids és la molècula d'acetat (que, als éssers vius se sol trobar activada, en forma d'acetil-Coenzim A), a partir de la qual s'obtenen dos tipus de molècules que donen lloc a dues de les grans famílies de compostos que constitueixen els lípids (hi ha alguna altra família lipídica que, en tot cas, esmentarem més endavant): els àcids grassos (a partir dels quals es formaran altres lípids més complexos, com el glicerolípid o els fosfolípids) i l'isoprè (a partir del qual deriven tots els lípids terpenoides i esteroides).

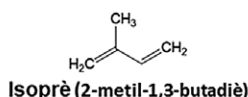
Els àcids grassos (fig. 11) estan formats per una cadena alifàtica més o menys llarga acabada amb un grup carboxil. La majoria d'àcids grassos na-

turals tenen un nombre parell d'àtoms de carboni, ja que procedeixen de la condensació de diverses molècules d'acetat (que té dos àtoms de carboni) i la majoria dels seus enllaços carboni-carboni solen ser senzills (àcids grassos saturats), tot i que alguns d'ells poden ser dobles (àcids grassos insaturats). Aquestes insaturacions s'afegeixen un cop sintetitzat l'àcid gras i els animals no podem incloure-les dins els darrers nou àtoms de carboni de la molècula. Aquests àcids grassos amb insaturacions en la part final de la molècula, que són essencials per a la nostra supervivència, els hem d'incorporar a partir de la dieta, ja sigui de productes vegetals o de productes d'animals que els hagin ingerit prèviament; segons la posició del primer doble enllaç comptat a partir del darrer àtom de carboni (anomenat carboni ω), trobem els àcids grassos ω-3 i els ω-6. Entre els àcids grassos més comuns, trobem els àcids palmític (C16:0, és a dir, amb 16 àtoms de carboni i cap doble enllaç) i l'estearic (C18:0), l'àcid oleic (C18:1, ω-9, és a dir, amb 18 àtoms de carboni i un doble enllaç, a 9 àtoms de carboni de distància del carboni ω), l'àcid linoleic (C18:2, ω6,9, amb dos dobles enllaços, a 6 i 9 àtoms de distància del carboni ω i, per tant, pertanyent a la sèrie ω-6), però també d'altres menys comuns, com ara l'àcid margàric (C17:0, amb nombre senar d'àtoms de carboni) o l'àcid fitànic (que presenta ramificacions a la cadena ali-

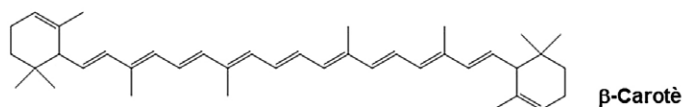
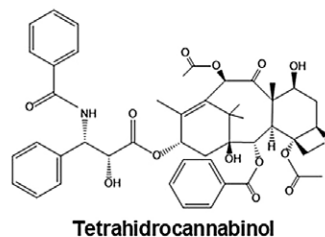
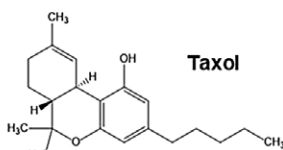
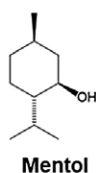
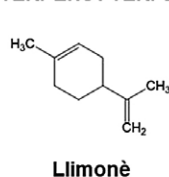
Però, a més, els àcids grassos es poden esterificar amb altres alcohols, i donar lloc a altres tipus de lípids, com ara els esfingolípid, tan importants per al bon funcionament del sistema nerviós (en aquest cas, l'alcohol que hi participa és l'esfingosina) o les ceres (amb altres tipus d'alcohols normalment de cadena llarga), com les que cobreixen moltes fruites o la pell i el pèl dels animals (com la lanolina de la llana).

Hi ha altres famílies de molècules que, tradicionalment, no s'inclouen dins de la categoria de lípids, però comparteixen amb ells tant la seva hidrofòbia com la seva organosolubilitat. Les quinones són molècules orgàniques amb grups aromàtics i diversos grups amb graus d'oxidació variable, sovint conjugats amb cadenes laterals isoprenoides; una de les més conegudes és la ubiquinona o coenzim Q10, essencial per a la respiració cel·lular i amb aplicacions cosmètiques. Els tocoferols són un altre tipus de molècules quasi lipídiques, també amb anells aromàtics, però heterocíclics (grup cromà); l'exemple més conegut és la vitamina E, que actua com a antioxidant.

LÍPIDS ISOPRENOIDES



TERPENS I TERPENOIDES



ESTEROIDES

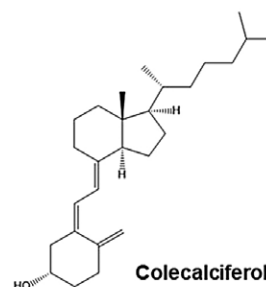
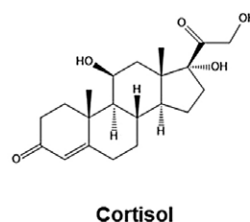
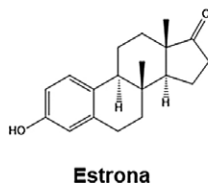
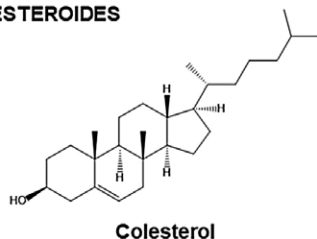


Figura 13. Lípids: lípids isoprenoides. L'estructura de tots aquests lípids es basa en la molècula d'isoprè, diverses unitats de la qual s'uneixen per donar les diferents famílies de lípids que es representen en aquesta figura. Tot i així, cal recordar que l'isoprè, en el fons, també procedeix de l'acetat. Trobem dues grans famílies de lípids isoprenoides. D'una banda, els terpens constitueixen un ampli conjunt de molècules, d'origen majoritàriament vegetal, que formen part de molts olis essencials aromàtics, així com altres molècules derivades, com ara els carotens (precursors de la vitamina A) o els cannabinoides. D'altra, trobem la família dels esteroides, uns terpenoides modificats que comparteixen una estructura cíclica bàsica, el ciclopentanoperhidrofenantrè. Entre aquests, trobem el colesterol de les membranes cel·lulars dels animals, les hormones esteroides (com les hormones sexuals masculines i femenines o el glucocorticoides) i la vitamina D.

Aminoàcids i proteïnes

El nom aminoàcid esvaeix qualsevol dubte: són molècules orgàniques amb un grup àcid (normalment, un carboxil) i un grup amina, en principi, tots dos en qualsevol posició de la molècula (fig. 15). A més, tots ells tenen un altre grup addici-

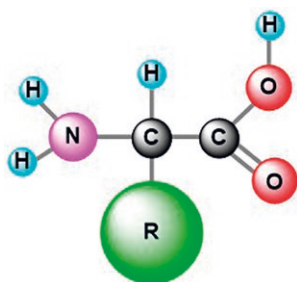


Figura 14. Aminoàcids: estructura d'un aminoàcid. Es podria dir que "amb el nom paguen". Els aminoàcids són biomolècules caracteritzades per presentar un grup amino $-NH_2$ i un grup àcid $-COOH$. Qualsevol molècula que compleixi aquests requisits és un aminoàcid. Ara bé, a la naturalesa els aminoàcids més abundants tenen aquests dos grups units a un mateix carboni que, com que és el primer després del grup carboxil, es denomina carboni alfa (C_α). Es tracta, per tant, d' α -aminoàcids, com el que esquemàticament es representa en aquesta figura.

onal, una cadena lateral de naturaleses molt diverses, que és el que els hi permet diferenciar-se entre ells. A la biosfera, hem identificat centenars d'aquests compostos, però hi ha un petit grup de vint que tenen una importància especial: són els únics que ens permeten fabricar proteïnes (fig. 15). La característica estructural comuna d'aquests vint aminoàcids proteics és que tots ells són L- α -aminoàcids, és a dir, que els dos grups cabdals, l'amino i el carboxil, es troben al carboni α i el grup amino té simetria L (és a dir, està a l'esquerra de la cadena de carbonis). Entre els aminoàcids proteics, n'hi ha que són apolars (alanina, prolina, metionina, valina, leucina, isoleucina, fenilalanina i triptòfan), polars neutres (glicina, serina, treonina, cisteïna, asparagina, glutamina i tirosina), àcids (àcid glutàmic, àcid aspàrtic) i bàsics (histidina, lisina i arginina). D'aminoàcids no proteics, n'hi ha que també són L- α -aminoàcids (com l'ornitina o la citrulina), d'altres que no tenen simetria L, sinó D (com la D-alanina, un dels components de la paret d'alguns bacteris), d'altres en què els grups amino i carboxil no estan al carboni α (com el γ -aminobutirat, un neurotransmissor, o la β -alanina, que forma part del coenzim A) i d'altres en què el grup àcid ni tan sols és un grup carboxil (com la taurina, que té un grup sulfonil).

AMINOÀCIDS PROTÈICS

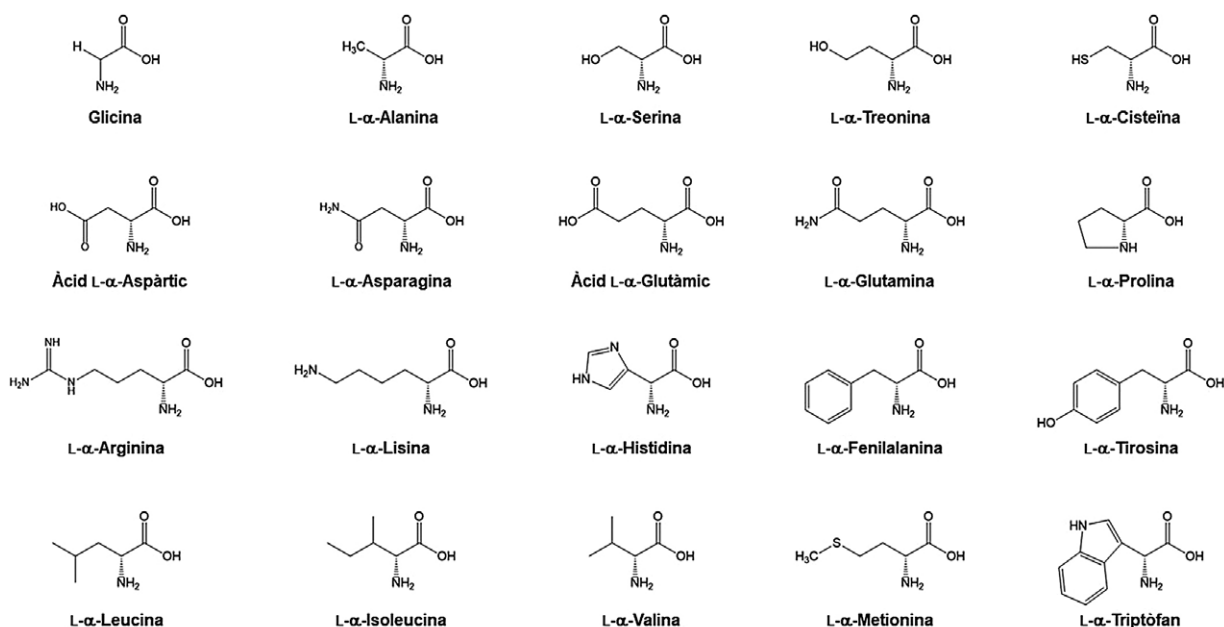


Figura 15. Aminoàcids: aminoàcids proteics. Els aminoàcids serveixen per fabricar proteïnes, però no tots ho poden fer. Només els 20 aminoàcids representats en aquesta figura són aminoàcids proteics i totes les proteïnes de la naturalesa consisteixen en diferents combinacions d'aquestes vint molècules.

PÈPTIDS

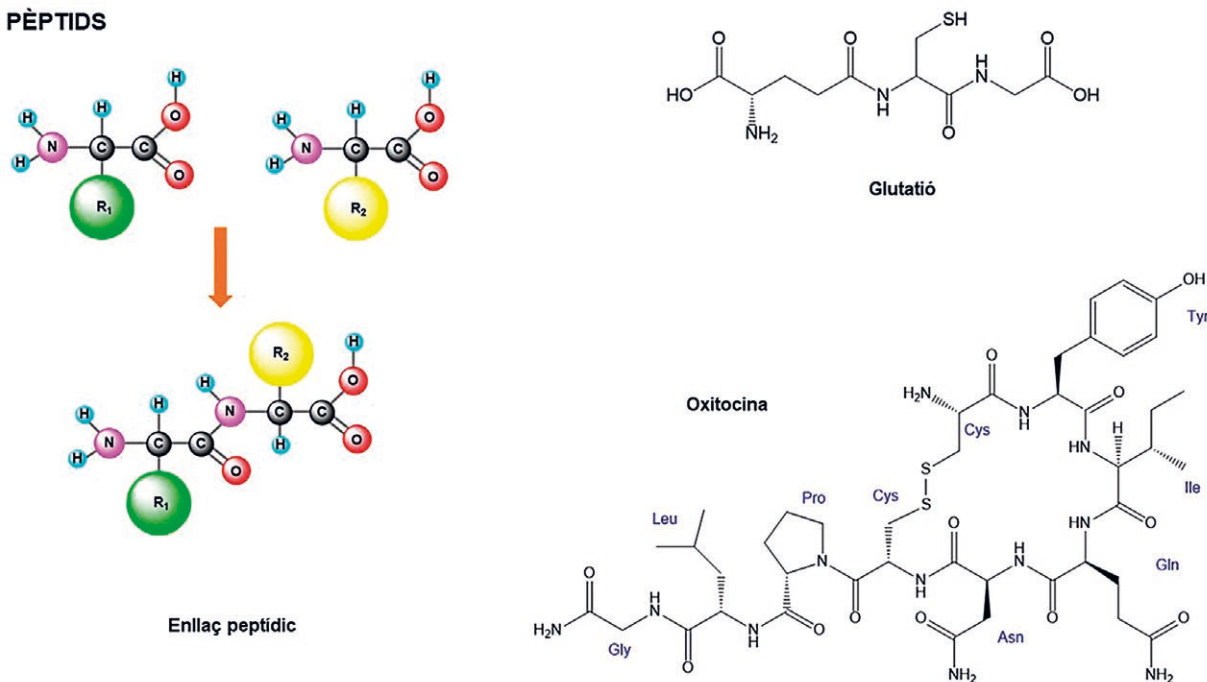


Figura 16. Aminoàcids: pèptids. Els aminoàcids es poden combinar entre ells, establint el que s'anomena enllaços peptídics entre el grup amino d'un d'ells i el grup carboxil d'un altre. Així, es poden formar cadenes d'aminoàcids, anomenades pèptids, que poden comptar amb unes poques molècules d'aminoàcids (oligopèptids, com els de la figura) o amb desenes, centenars i fins i tot algun miler d'aminoàcids (polipèptids, també anomenats proteïnes).

Els aminoàcids poden combinar-se entre ells mitjançant la reacció entre el grup carboxil d'un d'ells i el grup amino d'un altre, establint el que s'anomena un enllaç peptídic i donar lloc a un pèptid (fig. 16). D'aquesta manera es poden formar

cadenes seqüencials d'uns quants aminoàcids (oligopèptids) o de centenars d'ells, la seqüència dels quals ve determinada per la informació continguda al material genètic de l'organisme (proteïnes). Les proteïnes són la classe més abundant de

biomolècules, constituint més del 50% del pes sec d'una cèl·lula, i aquesta abundància és un reflex de la multitud de funcions que són capaces de dur a terme. Totes les funcions cel·lulars, gairebé sense excepció, requereixen de la participació d'alguna proteïna. Així, trobem proteïnes amb activitat catalítica que permeten realitzar les reaccions químiques del metabolisme (els enzims); amb activitat reguladora (hormones com la insulina o bé els receptors de totes les hormones); transportadores (ja sigui entre òrgans, com l'hemoglobina, o per permetre el bescanvi de molècules entre l'exterior i l'interior de les cèl·lules); d'emmagatzematge (com la caseïna de la llet, l'albumina de l'ou o les que formen el gluten del blat); motrius (com les proteïnes contràctils dels nostres músculs, l'actina i la miosina); estructurals (com el col·lagen i l'elastina del nostre teixit conjuntiu, o les queratines de pèls i ungles); protectores (com els anticossos del nostre sistema immune o les proteïnes coaguladores de la sang, com la trombina i el fibrinogen); o fins i tot amb moltes altres funcions molt més particulars que observem en organismes determinats (per exemple, la proteïna anticongelant de la sang d'alguns peixos de mars polars, com el bacallà d'Islàndia).

Nucleòtids i àcids nucleics

Els nucleòtids són molècules relativament complexes per la seva grandària, ja que consten de tres components ben diferents: una base nitrogenada, un monosacàrid de tipus pentosa i una

o diverses molècules d'àcid ortofosfòric (fig. 17). En el cas dels nucleòtids, les bases nitrogenades consten d'un anell heterocíclic que conté dos àtoms de nitrogen en el cas de les pirimidines (les més comunes són la citosina, la timina i l'uracil) o un anell heterocíclic doble amb quatre àtoms de nitrogen en el cas de les purines (com l'adenina i la guanina), tot i que també n'hi pot haver d'altres més complexes, com les flavines. Pel que fa a la pentosa, sol ser una molècula de ribosa (i, per tant, parlem de ribonucleòtids), però també hi ha nucleòtids que tenen una forma més reduïda de la ribosa, la desoxiribosa (els desoxiribonucleòtids). Finalment, segons el nombre de molècules de fosfat que contenen, podem distingir entre els nucleòsids (sense fosfat; segons la base que continguin tenim: adenosina, guanosina, citidina, timidina i uridina) i els nucleòtids monofosfat, difosfat o trifosfat (amb una, dues o tres molècules de fosfat, respectivament).

La principal funció dels nucleòtids és la síntesi dels àcids nucleics, l'ADN i l'ARN, també coneguts per les seves sigles en anglès, DNA i RNA. Els àcids nucleics són polímers lineals de nucleòtids units per enllaços fosfodièster establerts entre el grup hidroxil del carboni 3 de la pentosa d'un d'ells i el fosfat unit al carboni 5 de la pentosa del següent; com que tots dos àtoms pertanyen a la pentosa, s'assenyalen amb una "prima" per distingir-los dels de la base nitrogenada i, per tant, ens referim a ells com els carbonis 3' i 5'. Tot i ser molt semblants, hi ha algunes diferències

NUCLEÒTIDS

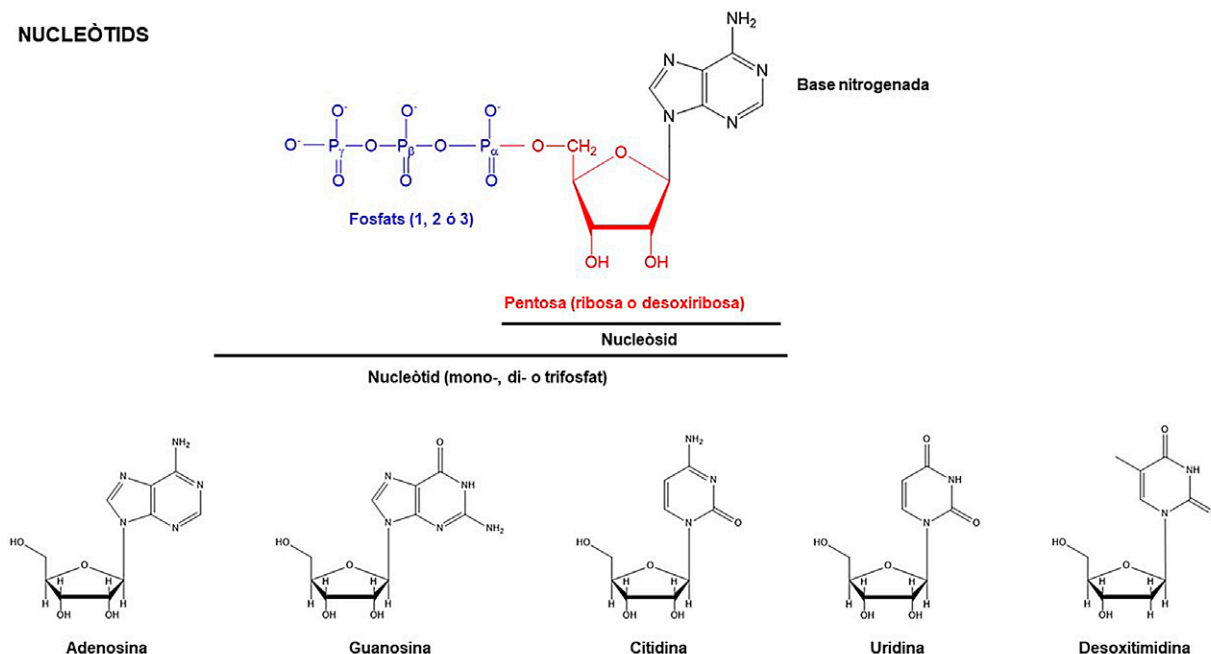


Figura 17. Nucleòtids: estructura i nucleòtids principals. Els nucleòtids són molècules formades per un sucre, ribosa o desoxiribosa, una base nitrogenada i un, dos o tres grups fosfat. El seu paper principal és el de formar les cadenes de nucleòtids que coneixem com a àcids nucleics, l'ARN i l'ADN (segons els seus nucleòtids tinguin ribosa o desoxiribosa). En aquest cas, només hi ha cinc bases nitrogenades que en poden formar part: l'adenina, la guanina, la citidina, l'uracil (sempre associat a ribosa i, per tant, component de l'ARN) i la timina (sempre unida a desoxiribosa i, per tant, formant part de l'ADN).

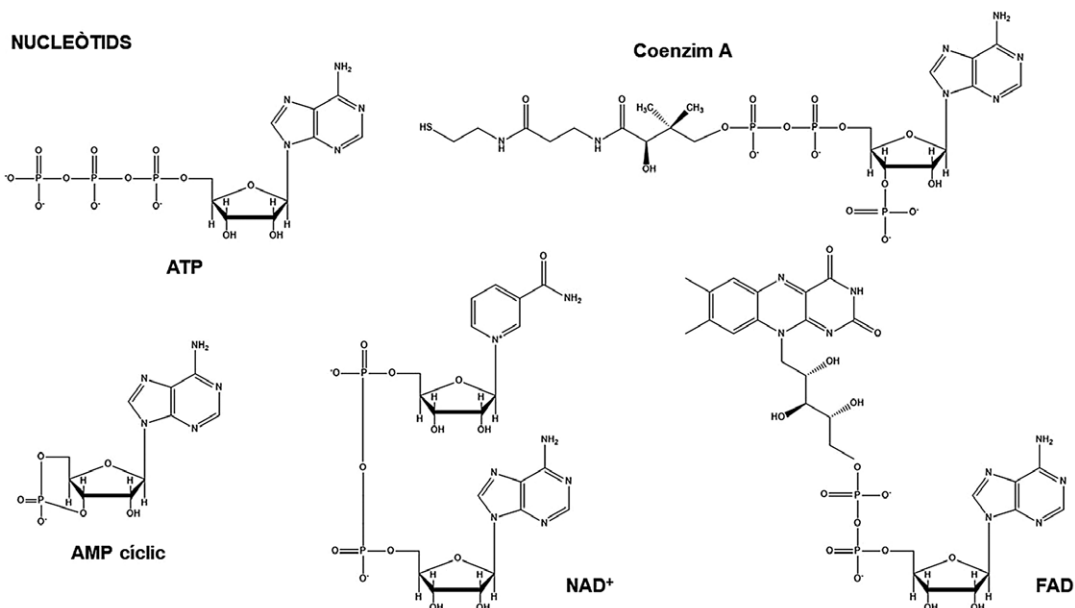


Figura 18. Nucleòtids: nucleòtids amb altres funcions. No tots els nucleòtids formen part dels àcids nucleics i, fins i tot aquells que en poden formar part, també poden tenir altres funcions. Un dels exemples més coneguts és l'ATP (nucleòtid trifosfat amb ribosa i adenina), que és la gran molècula energètica de les nostres cèl·lules. També participa en altres molècules, com ara el coenzim A, fonamental en molts processos metabòlics, o l'AMPcíclic, una importantíssima molècula senyalitzadora. A més, també trobem nucleòtids amb altres bases nitrogenades, com ara la nicotinamida (en el NAD) o la flavina (en el FAD), molècules clau en el procés de respiració cel·lular.

fonamentals entre els dos tipus d'àcids nucleics. Així, a l'ADN la pentosa és una desoxiribosa, mentre que a l'ARN és una ribosa. A més, tots dos difereixen en una de les bases dels seus nucleòtids, ja que allà on l'ADN presenta nucleòtids de timina, l'ARN en té d'uracil. Pel que fa a la seva estructura, l'ADN sol estar format per dues cadenes complementàries unides entre si, mentre que l'ARN és monocatenari, excepte en alguns virus. Aquestes diferències són crucials per explicar les funcions d'un i l'altre. L'ADN és una molècula molt menys reactiva que l'ARN, el que la converteix en un magnífic magatzem d'informació, ja que aquesta informació serà molt més estable al llarg del temps si la molècula que la conté no pateix gaires modificacions. Per contra, l'ARN és més petit i més reactiu que l'ADN i, per tant, és la molècula ideal per transcriure la informació continguda a l'ADN i permetre la seva traducció en forma de proteïnes (en el cas del que anomenem ARN missatger o mRNA). L'ARN, a més, pot tenir altres funcions més actives que l'ADN, per exemple, en el mateix procés de la traducció (l'ARN ribosòmic o rRNA), en la incorporació dels aminoàcids a les proteïnes (l'ARN de transferència o tRNA) o en la regulació del procés de la transcripció i la maduració de l'ARN missatger (els coneguts com ARN nuclears petits o snRNA).

Tot i que la funció més coneguda dels nucleòtids sigui la de servir per a la formació dels àcids nucleics, també trobem molts nucleòtids participant en activitats cel·lulars molt diverses (fig. 18):

- L'ATP (trifosfat d'adenosina) és la principal

molècula d'intercanvi energètic de les cèl·lules.

- L'AMP cíclic (AMPc) és un important agent regulador del metabolisme.

- El coenzim A, tan important en moltes reaccions cel·lulars, conté una molècula d'AMP.

- El dinucleòtid de nicotinamida (una altra base nitrogenada) i adenosina (NAD) i el dinucleòtid de flavina i adenosina (FAD) són dos intermediaris imprescindibles en la respiració cel·lular i l'obtenció d'energia per a la cèl·lula.

Altres biomolècules

A la naturalesa existeixen molts altres tipus de biomolècules (fig. 19), amb funcions molt més restringides, però no per això menys essencials per als organismes que les necessiten. En farem un petit repàs d'algunes, potser de les més importants, però encara en restaran d'altres que es podrien incloure també.

- Porfirines, formades per quatre anells heterocíclics (pirroles) i un àtom metàl·lic, magnesi en el cas de les clorofil·les, ferro en el cas dels hemo i cobalt en el cas de la vitamina B12.

- Flavonoides, molècules fenòliques d'origen vegetal, moltes d'elles amb funció de pigments (com la pelargonidina que dona el color vermell als fruits vermells, o la quercetina i la miricetina, que donen colors als vins negres i blancs). S'ha parlat molt d'ells ja que poden tenir moltes aplicacions farmacològiques en humans.

- Alcaloides, grup heterogeni de compostos caracteritzats per la presència d'anells heterocí-

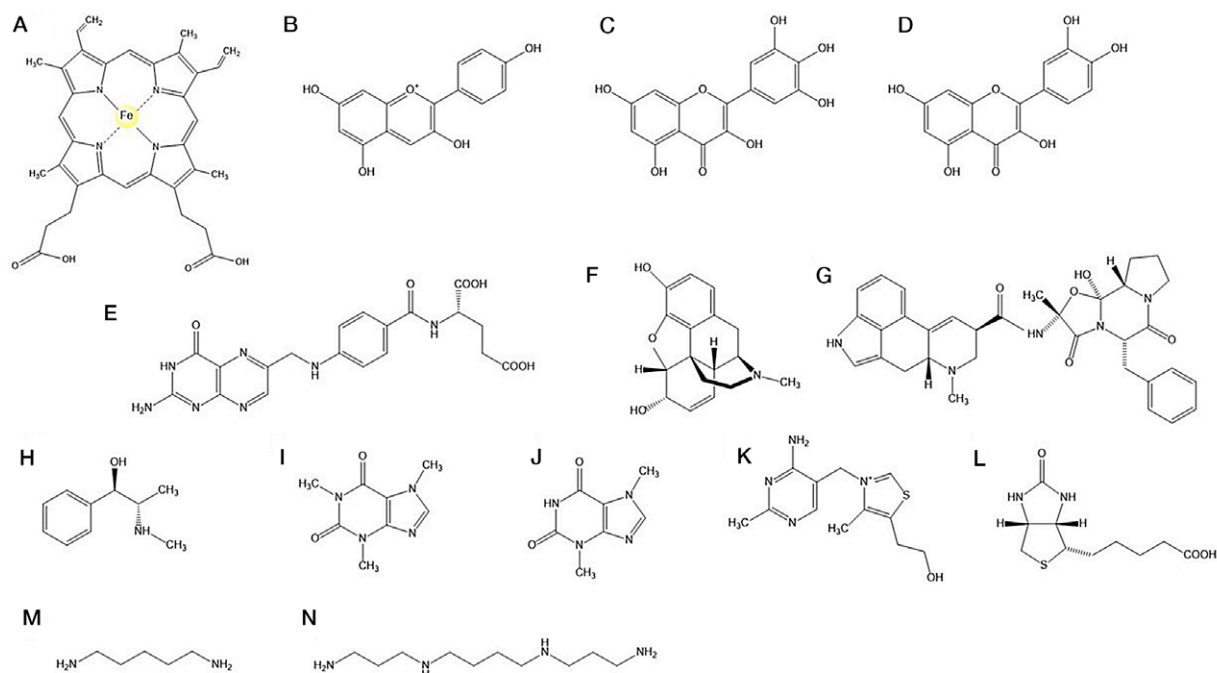


Figura 19. Altres biomolècules. El ventall de molècules biològiques és amplíssim i no podem llistar-les totes. En aquesta figura, es presenta un petit resum d'altres biomolècules que són especialment rellevants en certs processos cel·lulars. Les porfirines (A) participen en la respiració cel·lular, el transport d'oxigen o la fotosíntesi. Els flavonoides (B, pelargonidina; C, quercetina; D, miricetina) participen en molts pigments vegetals i poden tenir aplicacions farmacològiques. L'àcid fòlic (E), una pterina, resulta clau en la divisió cel·lular. Els alcaloides (F, morfina; G, ergotamina; H, efedrina; I, cafeïna; J, teobromina) solen tenir funció defensiva en plantes i fongs, però les seves propietats són molt apreciades també en farmacopea. Les vitamines (K, tiamina; L, biotina) participen en moltes reaccions del metabolisme i la seva absència es tradueix en quadres patològics greus. Les poliamines (M, cadaverina; N, espermidina) poden tenir un origen espontani durant la putrefacció, però també participen en el procés de divisió cel·lular.

clics i procedents, habitualment, del metabolisme d'algun aminoàcid. Solen ser d'origen vegetal, tot i que també s'han trobat a fongs i bacteris i, fins i tot, a algun animal. La seva funció sol ser defensiva, com a defensa química contra els possibles consumidors.

– Pterines, molècules complexes formades per un grup pterina, una molècula de *p*-aminobenzoat i una o diverses molècules de glutamat. Les més conegudes són l'àcid fòlic (una vitamina que ens ajuda a combatre certs tipus d'anèmia) i els pigments de les ales de les papallones.

– Vitamines hidrosolubles (conexes amb B), de naturalesa molt diversa. Cadascuna resulta clau en determinats processos enzimàtics i la seva carença provoca malalties que poden tenir conseqüències molt importants. Així, la carença de vitamina B1 o tiamina, que participa en el procés d'obtenció d'energia al cervell, té símptomes neurològics molt greus (beri-beri). La carença de biotina, fonamental en molts processos bioquímics, genera un quadre molt complex de símptomes cutanis, digestius, musculars i neurològics.

– Poliamines, derivades de la descarboxilació dels aminoàcids. Algunes es formen espontàniament després de la mort de l'organisme, donant l'olor característica dels cadàvers (cadaverina, putrescina), però d'altres són fabricades en vida per ajudar a regular multitud de processos cel·lulars, com la divisió i la diferenciació de les cèl·lules (espermina, espermidina).

Bibliografia

- Bauquis, P.-R., Bauquis, E. 2007. *Entender el futuro. Petróleo y gas natural*. HIRLE. Estrasburg.
- Garrett, R.H., Grisham, C.H. 2013. *Biochemistry*. 6^a edició. Cengage Learning. Boston.
- Hurlbut Jr, C.S., Klein, C. 1991. *Manual de Mineralogía de Dana*. 3^a edició. Editorial Reverté. Barcelona.
- Inglés, M., Martí, J., Palau, J. 1986. *Les roques. Introducció a la petrologia*. KETRES Editora. Barcelona.
- Montaña Pedrero, AM. 2018. *Química orgànica estructural. Enlace químico i constitució molecular*. Volum I. 4^a edició. Pearson Educación, SA. Madrid.
- Zubay, G. 1988. *Biochemistry*. Macmillan. Nova York.